УДК 612.8:519.7

# ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВЫЗВАННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТВЕТА МЫШЦЫ

В.А. Кочегуров, Л.И. Константинова, Т.Е. Хохлова

Томский политехнический университет
E-mail: am@am.tpu.ru

При травмах нервно-мышечной системы конечностей для оценки тяжести патологического процесса и выявления динамики восстановления нервов в процессе курса лечения используют характеристики сигнала, регистрируемого при раздражении нерва электрическим током. В статье рассматривается его вейвлет-преобразование. Приводится анализ вейвлет-коэффициентов для различных групп пациентов.

## Введение

Для исследования состояния нервно-мышечной системы используется метод электронейромиографии (ЭНМГ). ЭНМГ-метод основан на регистрации и анализе биоэлектрической активности мышечных и нервных волокон, как спонтанной, т.е. отражающей состояние их в покое и при произвольном мышечном напряжении, так и вызванном, т.е. обусловленной электрической стимуляцией нерва или мышцы различной интенсивности и частоты [1]. Электронейромиография позволяет судить об уровне поражения, о степени тяжести травмы. Она также используется в качестве оперативного контроля адекватности воздействия электростимуляции и для оценки скорости восстановительных процессов в нервно-мышечном аппарате. Современная аппаратура для проведения ЭНМГ позволяет регистрировать следующие ответы мышц: М-ответ, Н-рефлекс, F-волну [1]. Среди ответов выделяют:

- М-ответ – вызванный электрический ответ мышцы, возникающий при электрическом раздражении двигательных волокон нерва;
- Н-рефлекс – рефлекторный, возникающий в мышце при электрическом раздражении чувствительных волокон нерва;
- F-волна, возникающая в мышце при электрической стимуляции двигательных аксонов нерва.

М-ответ – это вызванный электрический ответ мышцы, являющийся суммарной одновременной реакцией двигательных единиц мышцы в ответ на электрическое раздражение нерва, график которого представлен на рис. 1 [1].

Форма, амплитуда и латентный период М-ответа определяют функциональное состояние нервных волокон и изменяются при травме.

Построение математической модели, описывающей форму М-ответа, является актуальной задачей. Анализ параметров этой модели у различных групп больных позволяет произвести их группировку; оценить тяжесть патологического процесса, дать оценку скорости восстановительных процессов в нервно-мышечном аппарате у индивида в курсе лечения после проведённой процедуры.

В настоящее время для математического описания и анализа сигналов все больше используют вейвлеты. Термин "сигнал" обозначает набор численно зафиксированной информации о каком-либо процессе, объекте и т.п. Под "анализом" сигнала имеется в виду не только его математическое преобразование, но и получение на основе этого преобразования выводов о специфике соответствующего процесса или объекта.

На основе понятия о векторном пространстве общепринятым подходом к анализу сигналов s(t) стало их представление в виде взвешенной суммы простых составляющих – базисных Psi-функций $\psi_k(t)$, помноженных на коэффициенты $C_\iota$ [2]:

$$\sigma(\tau) = \sum_{\kappa} X_{\kappa} \cdot \psi_{\kappa}(\tau). \quad (1)$$

Так как базисные функции $\psi_k(t)$ представляются заданными как функции определенного вида, то только коэффициенты $C_k$ содержат информацию о конкретном сигнале. Таким образом, можно говорить о возможности представления произвольных сигналов на основе рядов (1) с различными базисными функциями.

Вейвлет – это некоторая Psi-функция, которая должна обладать следующими свойствами [2]:

- График такой функции должен осциллировать вокруг нуля в окрестности некоторой точки на оси t, причем
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\tau)\delta\tau = 0.$$
- Норма этой функции должна быть конечной:
$$\|\psi\| = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^2(\tau)\delta\tau\right)^{1/2} < +\infty.$$

Psi-функция создается на основе той или иной базисной функции $\psi_0(t)$, которая определяет тип вейвлета. Базисная функция должна удовлетворять всем требованиям, которые отмечены для Psi-функции. Она должна

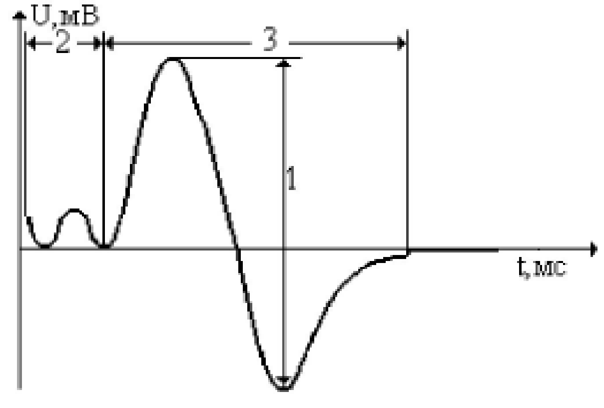



Рис. 1. Форма М-ответа: 1) размах амплитуды; 2) латентный период; 3) длительность сигнала

обеспечить выполнение двух операций:

– смещение по оси времени t – $\psi_0$(t–b) при b∈R;

– масштабирование – $a^{-1/2}\psi_0(t/a)$ при a>0 и a∈R, где R – область ограничения сигнала s(t).

Тогда Psi-функцию можно записать:

$$\psi(\tau) \equiv \psi(\alpha, \beta, \tau) = \alpha^{1/2} \cdot \psi_0\left(\frac{\tau - \beta}{\alpha}\right). \quad (2)$$

При заданных a и b функция ψ(t) и есть вейвлет. Вейвлеты являются вещественными функциями времени t, параметр b в (2) задает положение вейвлетов по оси времени, а параметр a – масштаб.

При вейвлет-преобразовании выбор типов базисных функций (вейвлетов) намного более обширен, чем при преобразовании Фурье. В качестве вейвлетов могут использоваться ортогональные и биортогональные непериодические функции, функции, имеющие глобальный экстремум и быстрое затухание на бесконечности и т.д. Все это дает обширные возможности для представления различных сигналов.

Прямое непрерывное вейвлет-преобразование сигнала s(t) задается путем вычисления вейвлет-коэффициентов по формуле [2]:

$$X(\alpha, \beta) = \int_R \sigma(\tau) \cdot \alpha^{-1/2} \cdot \psi\left(\frac{\tau - \beta}{\alpha}\right) \delta\tau, \quad (3)$$

где R – область ограничения сигнала s(t), a,b∈R, a≠0, ψ(t) – вейвлет-функция, параметр b – задаёт положение вейвлет-функции, а параметр a – её масштаб. Вейвлет-коэффициенты определяются интегральным значением скалярного произведения сигнала на вейвлет-функцию заданного вида.

Прямое вейвлет-преобразование можно рассматривать как разложение сигнала по всем возможным сдвигам и растяжениям/сжатиям сигнала s(t) или некоторой произвольной функции. При этом параметры a и b могут принимать любые значения в пределах указанных выше областей их определения. Заметим, что преобразование Фурье также можно рассматривать как разложения по сдвигам (имеется в виду фазовый сдвиг гармоник, зада-

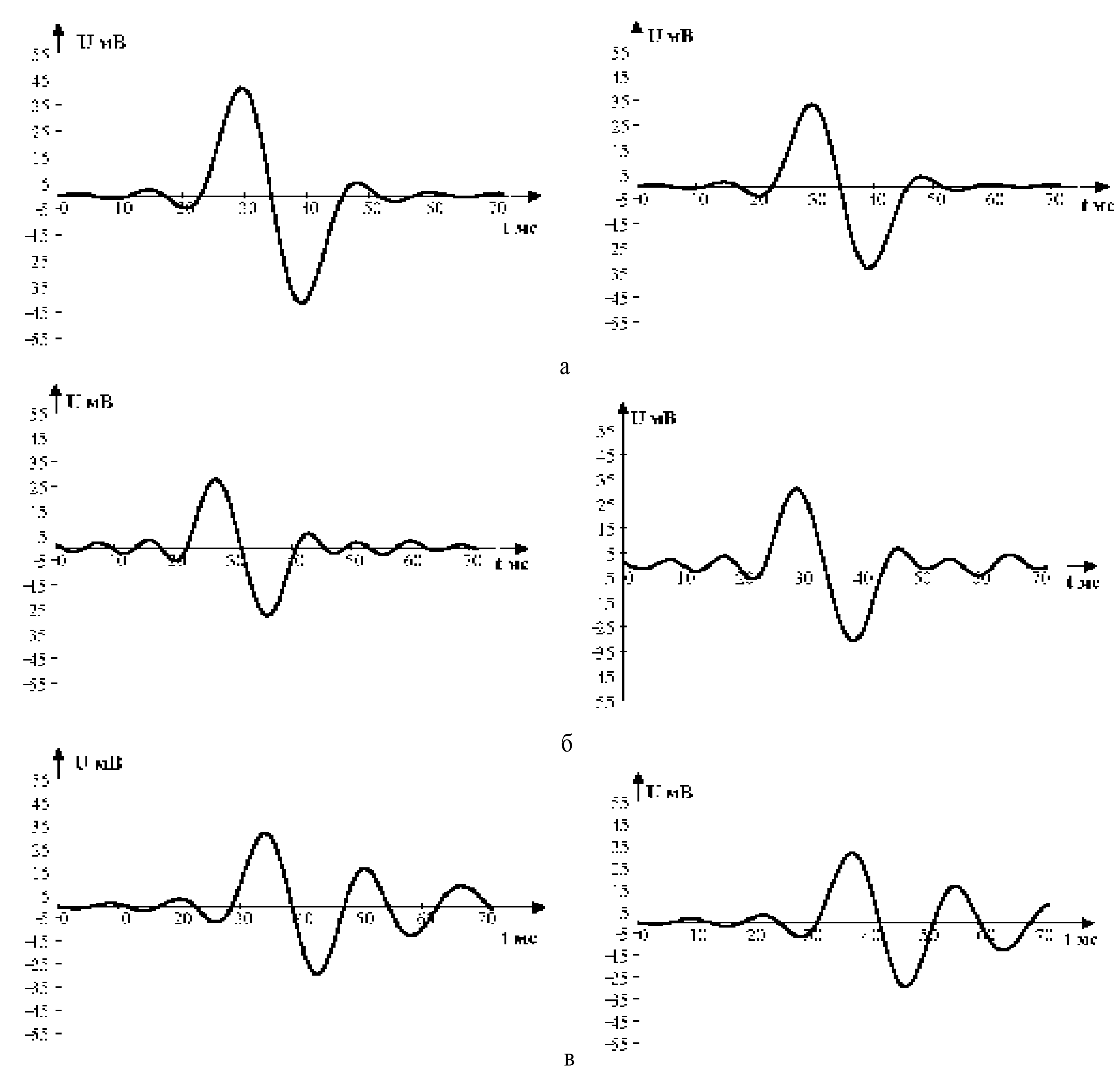



Рис. 2. Графики восстановленного при помощи вейвлет-преобразования сигнала М-ответа

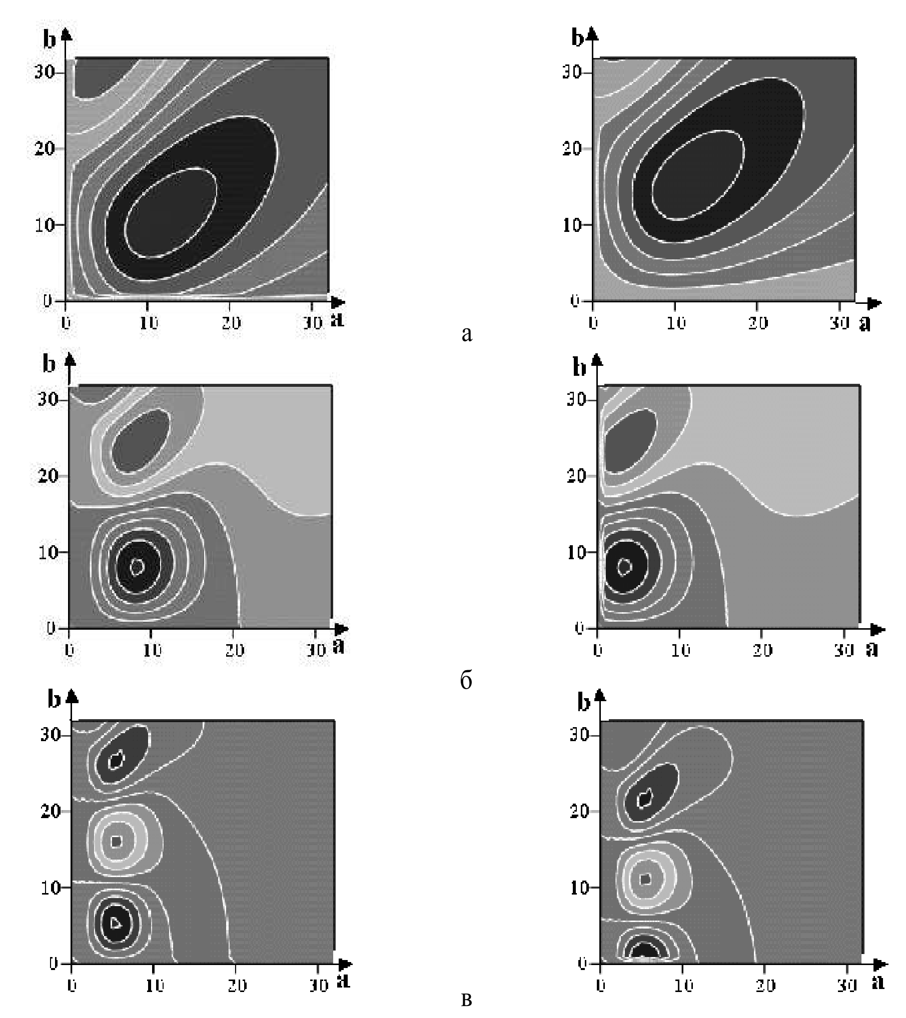



Рис. 3. Области расположения вейвлет-коэффициентов

ющих положение их графиков) и растяжением/сжатием (определяемым значением амплитуд гармоник), но применительно к одной функции (синусоиде), не очень удобной для представления локальных особенностей сигналов.

Обратное непрерывное вейвлет-преобразование осуществляется по формуле [2]:

$$\sigma(\tau) = \frac{1}{K_{\psi}} \cdot \iint_{\Gamma} X(\alpha, \beta) \cdot \alpha^{1/2} \cdot \psi\left(\frac{\tau - \beta}{\alpha}\right) \cdot \frac{\delta\alpha\, \delta\beta}{\alpha^2}, \quad (4)$$

где $K_{\psi}$ – константа, определяемая функцией $\psi$.

### Вейвлет-преобразование М-ответа

Рассмотрим применение вейвлет-преобразования для математического описания вызванного потенциала мышцы (М-ответа) с целью выявления его особенностей, которые характеризуют свойства нервно-мышечной системы человека. В частности, интерес представляет исследование соответствия между особенностями М-ответа и степенью тяжести травмы нерва конечности.

Для исследования были взяты две группы людей: здоровых и больных, с различной степенью тяжести травмы. Для математического описания М-ответа в качестве базисной вейвлет-функции используется вейвлет "мексиканская шляпа". Его временной образ описывается аналитическим выражением [3]:

$$\psi_0 = (1 - \tau^2) \cdot \varepsilon^{-t/2}.$$

В соответствии с формулой (2) перейдем к вейвлету:

$$\psi(\alpha, \beta, \tau) = \psi_0\left(\frac{\tau - \beta}{\alpha}\right) = \left(1 - \left(\frac{\tau - \beta}{\alpha}\right)^2\right) \cdot \varepsilon^{-\left(\frac{\tau - \beta}{\alpha}\right)^2 / 2}.$$

Прямое и обратное вейвлет-преобразование осуществляется по формулам (3) и (4). Все преобразования проводились при помощи системы компьютерной математики Mathcad 2001.

Для каждого индивида из представленных групп получены вейвлет-преобразование сигнала М-ответа и графическое изображение области расположения вейвлет-коэффициентов. Область расположения значимых (ненулевых) значений определяется параметрами b и a, где a – определяет масштаб амплитуды сигнала М-ответа, а b – расположение этой амплитуды по оси времени t.

Анализ результатов приводит к следующим выводам:

1. М-ответ у здоровых людей представляет собой сигнал, который имеет один положительный пик с

определенной амплитудой (рис. 2, а), а у больных – с несколькими пиками и амплитудами меньшими по величине (рис. 2, б, в). Это связано с тем, что сигнал М-ответа отражает одновременную реакцию двигательных единиц мышцы на электрическое раздражение нерва. У больных пациентов в результате травмы двигательные единицы мышцы реагируют неодновременно, и это отражается в виде нескольких пиков.

2. У здоровых людей (рис. 3, а) области локализации значимых вейвлет-коэффициентов отличаются от областей больных пациентов (рис. 3, б, в) как характером расположения (по параметру a), так и их числом (по параметру b). Количество положительных пикой сигнала М-ответа связано с количеством областей локализации значимых вейвлет-коэффициентов.
3. В группе больных пациентов по числу расположения вейвлет-коэффициентов (по параметру b) выделилось две подгруппы. Анализ состояния пациентов, проведенный врачом-экспертом, позволяет сделать вывод, что у пациентов с легкой степенью тяжести травмы области локализации две (рис. 3, б), а с тяжелой – три (рис. 3, в).
4. Границы (по параметру a) локализации значимых вейвлет-коэффициентов для различных групп пациентов также отличаются. Так у здоровых они расположены в пределах от 5 до 25, у больных с легкой степенью тяжести травмы – от 4 до 17, с тяжелой – от 3 до 10.

Таким образом, использование вейвлет-преобразования для математического описания М-ответа позволяет восстановить сигнал, а по характеру и количеству областей расположения значимых вейвлет-коэффициентов можно оценить степень тяжести травмы.

В дальнейшем, используя математическое описание М-ответа, предполагается построить обобщенные показатели, с помощью которых можно было бы оценить тяжесть патологического процесса и скорость восстановительных процессов в нервно-мышечном аппарате в курсе лечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Е.И., Коновалов А.Н., Беляков В.В. Методы исследования в нейрологии и нейрохирургии. – М.: Нолидж, 2000. – 336 с.
2. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: Солон-Р, 2002. – 448 с.
3. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171. – № 5. – С. 465–501.

УДК 535.416.3